8M

УДК 004

Р.И. Мануйленко, Т.С. Хашан
Институт прикладной математики и механики НАН Украины, г. Донецк, Украина
khashan@mail.ru

Расчет оптимальных геометрических параметров акустических антенн в системах технического слуха

Для систем технического слуха, устанавливаемых на борт малых мобильных роботов, построена модель акустической антенны с оптимальными геометрическими параметрами для среднего диапазона частот.

Введение

Одним из важных направлений искусственного интеллекта является моделирование и разработка систем очувствления робототехнических систем (РТС). Системы очувствления роботов можно разделить на следующие группы: локационные (в том числе и системы технического слуха – СТС), системы технического зрения, тактильные, силомоментные, внутренней информации [1-3]. Данная работа рассматривает вопросы, связанные с моделированием оптимальных геометрических форм антенн для СТС.

Теоретические и экспериментальные работы по созданию СТС можно разделить по двум направлениям: точное воссоздание (копирование) геометрических форм органов слуха человека и животных [4-6]; моделирование оптимальных геометрических форм, отличных или приближенных к «живому миру» [1], [7-9].

Первое направление развивается по принципу «все наилучшее создано самой природой». Второе ищет новые альтернативные геометрические формы и размеры акустических антенн для искусственных систем слуха. Форма антенны от вида к виду очень сильно варьируется, что оказывает большое влияние на ее функциональные возможности. При использовании этих двух подходов ученые решают следующие проблемы: выбор оптимальной формы и размера акустической антенны для обеспечения наилучшего качества и дальности приема принимаемой акустической информации, расширение рабочего диапазона частот, выбор требуемых диаграммы направленности и чувствительности. В зависимости от размеров РТС накладываются также ограничения и на параметры проектируемых антенн, геометрические размеры которых могут быть меньше принимаемой длины волны. Поэтому построение модели акустических антенн с оптимальными геометриическими параметрами с учетом предъявляемых требований к СТС, устанавливаемых на борту малых РТС, является важной и актуальной задачей.

Постановка задачи

Целью исследования данной работы является моделирование оптимальных геометрических параметров акустических антенн для обеспечения требований, предъявляемых к СТС, устанавливаемых на малых РТС. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

– рассчитать оптимальную форму и размеры акустических антенн, при которых усиление давления в точке приема звука будет максимальным при заданных ограничениях;
– провести численные исследования геометрических форм антенн.

Для расчета оптимальных геометрических параметров антенны рассматривается задача, когда в нее поступает плоская волна. Относительно колебательных процессов, происходящих внутри антенны, делаются следующие допущения: ее стенки предполагаются абсолютно твердыми и неспособными колебаться.

Для решения рассматриваемой задачи необходимо найти и рассчитать такую форму антенны и ее геометрические параметры, при которой усиление давления p в точке приема (т.е. в той точке, где расположен микрофон) будет максимальным при следующих ограничениях: x_0 – длина антенны, r_0 – радиус максимального отверстия, r_1 – радиус минимального отверстия, ω – рабочий диапазон частот.

Расчет оптимальных геометрических параметров антенн

При расчете оптимальных геометрических форм считается, что колебания всех точек, принадлежащих одному нормальному сечению антенны, являются одинаковыми, а именно поверхности волны внутри антенны принимаются плоскими и нормальными к оси рупора. Вследствие последнего допущения весь колебательный процесс представляется функцией лишь двух переменных – координаты x и времени t. Площадь сечения рупора является функцией координаты x: $S = S(x)$. Скорость монохромной волны ξ, излучаемой источником, выражается через потенциал φ следующим образом:

$$\xi = \frac{-\partial\varphi}{\partial x}. \qquad (1)$$

Потенциал φ является функцией, удовлетворяющей дифференциальному уравнению Вебстера [10]:

$$\frac{-\partial^2\varphi}{\partial t^2} = C^2\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + s(x)\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right), \qquad (2)$$

где $s(x) = \frac{dS(x)}{dx}$, C – скорость звука в невозмущенной среде, $C = const$ и $C = 340$ м/с. Комплексный потенциал представляется в виде произведения функции координаты x и простых колебаний:

$$\phi\ (x, t) = \psi\ (x)\, e^{i\omega\ t}. \qquad (3)$$

Физический смысл имеет только вещественная часть потенциала (реже – мнимая).

Давление p представляется в виде суммы давления в невозмущенной среде p_0 и давления δp, вызванного звуковыми волнами. Величина p_0 является постоянной, а δp выражается формулой [10]:

$$\delta p = i\rho\omega e^{i\omega t}\psi(x), \qquad (4)$$

где ρ – исходная плотность среды. Как и в случае с потенциалом $\phi(x,\ t)$, физический смысл имеет вещественная часть. Таким образом, амплитуда давления пропорциональна амплитуде потенциала.

Подставив представление (3) в (2), получим для $\psi(x)$ следующее обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + s(x)\frac{d\psi}{dx} + k^2\psi = 0, \qquad (5)$$

где $k = \frac{\omega}{C}$.

Из уравнения (5) следует, что для решения поставленной задачи необходимо найти функцию $s(x)$, при которой значение потенциала в точке x_0 имеет экстремум. Это задача на условный экстремум.

Если требуется найти экстремум функционала $\int_a^b f(x,y,y',y'')$ при условии $\int_a^b v(x,y,y',y'')=\beta$, то искомая кривая должна быть экстремалью [11]:

$$\int_a^b \left(f(x,y,y',y'')-\lambda v(x,y,y',y'')\right)dx=\int_a^b Fdx \to ext. \tag{6}$$

Это уравнение сводится к дифференциальному уравнению Эйлера:

$$\frac{\partial F}{\partial y}-\frac{d}{dx}\frac{\partial F}{\partial y'}+\frac{d^2}{dx^2}\frac{\partial F}{\partial y''}=0. \tag{7}$$

В данном случае для функции $\psi(x)$ имеются следующие начальные условия:

$$\psi(0)=\psi_0; \quad \psi'(0)=\xi, \tag{8}$$

для функции $S(x)$ – краевые условия:

$$s(0)=\pi r_0^2; s(x_0)=\pi r_1^2. \tag{9}$$

Экстремум функции $\psi(x)$ является экстремалью функционала $\int_0^{x_0}\psi'(x)dx$. Уравнение

$$\int_0^{x_0}\left(\psi''(x)+s(x)\psi'(x)+k^2\psi(x)\right)dx=0$$

можно рассматривать как условие на функции. Таким образом, необходимо найти экстремум функционала:

$$\int_0^{x_0}\psi'(x)\,dx-\lambda\left(\psi''(x)+s(x)\psi'(x)+k^2\psi(x)\right)dx \to ext. \tag{10}$$

Так как в интегральное уравнение входят две неизвестные функции, то производные необходимо находить по обеим функциям, то есть следует записать систему двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{gathered}\frac{\partial F}{\partial \psi}-\frac{d}{dx}\frac{\partial F}{\partial \psi'}+\frac{d^2}{dx^2}\frac{\partial F}{\partial \psi''}=0\\ \frac{\partial F}{\partial s}-\frac{d}{dx}\frac{\partial F}{\partial s'}=0\,.\end{gathered} \tag{11}$$

Первое уравнение запишется таким образом:

$$\lambda k^2+\lambda s'(x)=0\,. \tag{12}$$

Следовательно,

$$s'(x)=-k^2 \Rightarrow s(x)=\sigma-k^2x, \tag{13}$$

где σ – константа.

Так как $s(x)=\frac{d\ln S(x)}{dx}$, то, проинтегрировав, найдем

$$\ln S(x)=\sigma x-k^2\frac{x^2}{2} \Rightarrow S(x)=\pi r_0^2 e^{\sigma x-\frac{k^2x^2}{2}}. \tag{14}$$

Константу σ находим из граничных условий (9).

Теперь найдем решение уравнения (5), оно записывается через специальные функции Куммера [12]. Решениями уравнения Куммера, которое представлено

$$z\frac{d^2w}{dz^2}+(m-z)\frac{dw}{dz}-nw=0\,, \tag{15}$$

являются независимые функции Куммера $M(m,n,z)$ и $U(m,n,z)$, которые определяются следующим образом:

$$M(m,n,z)=\sum_{j=0}^{\infty}\frac{z^j\prod_{q=0}^{j-1}(m+q)}{j!\prod_{q=0}^{j-1}(n+q)}, \tag{16}$$

$$U(m,n,z)=\frac{\pi}{\sin\pi n}\left(\frac{M(m,n,z)}{\Gamma(1+m-n)\Gamma(n)}-z^{1-n}\frac{M(1+m-n,2-n,z)}{\Gamma(m)\Gamma(2-n)}\right).$$

Решение уравнения (5) записывается через функции Куммера:

$$\psi(x)=C_1M\left(-\frac{1}{2k^2},\frac{1}{2},\frac{(k^2x-\sigma)^2}{2k^2}\right)+C_2U\left(-\frac{1}{2k^2},\frac{1}{2},\frac{(k^2x-\sigma)^2}{2k^2}\right). \tag{17}$$

Константы C_1 и C_2 определяются из начальных и граничных условий. Из уравнения (17) найдем выражения для компонент скорости ξ и давления p:

$$\begin{aligned}\xi &= -e^{i\omega t}[C_1\mu'(x)+C_2\nu'(x)],\\ p &= p_0+i\rho\omega e^{i\omega t}[C_1\mu(x)+C_2\nu(x)],\end{aligned} \tag{18}$$

где

$$\mu(x)=M\left(-\frac{1}{2k^2},\frac{1}{2},\frac{(k^2x-\sigma)^2}{2k^2}\right),\ \nu(x)=W\left(-\frac{1}{2k^2},\frac{1}{2},\frac{(k^2x-\sigma)^2}{2k^2}\right). \tag{19}$$

На основании предложенных выше расчетов проведем численные исследования для оптимальной формы рупоров. Численные исследования для задачи проводились при следующих ограничениях: $x_0=0{,}2$ м, $r_0\le 0{,}1$ м, $r_1=0{,}025$ м, $\omega\in[100;2500]$ Гц, $C=340$ м/с. Для расчета оптимальных геометрических параметров рупоров использовались пакеты программ Excel 2007 и Maple 8. На рис. 1 построен график функции $r(x)$ – радиуса сечения рупора для указанных частот.

Как видно из рис. 1, предложенная в работе модель антенны является оптимальной и устойчивой на исследуемом диапазоне частот. При этом основное отличие построенной модели антенны – ее геометрические размеры, которые меньше либо совпадают с длиной принимаемой волны.

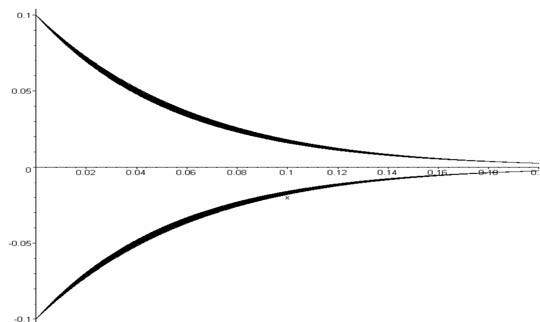


Рисунок 1 – График сечения рупора $r(x)$ для $\omega\in[100;2500]$

Заключение

Согласно цели исследования решена задача моделирования оптимальной формы и размеров акустических антенн для СТС, устанавливаемых на борту малых РТС. Оптимальные параметры антенн рассчитаны при заданных ограничениях с учетом анализа давления среды в антенне в точке приема звука. Численные исследования показали адекватность построенной модели и «близость» параметров модельных антенн для достаточно широкого диапазона исследуемых частот.

Дальнейшее развитие указанной работы заключается в решении следующих задач: экспериментальные исследования акустических свойств антенн на макетных СТС, их внедрение на борт малых РТС, а также построение модели и численное исследование оптимального расположения антенн в СТС.

Литература

1. Попов Е.П. Очувствление робототехнических систем [Электронный ресурс] / Е.П. Попов. – Режим доступа : www.ras.ru/FStorage/download.aspx?Id=b7a1b781-3773-4fff-bcdf-4483c737d488.
2. Лопота В. Закономерности развития мехатроники и робототехники / В. Лагота, Е. Юревич // Защита и безопасность. – 2008. – № 2 (45). – Режим доступа : http://faki.fizteh.ru/pub/a_3mhdk9.html.
3. Huang J. Building Ears for Robots: Sound Localization and Separation / J. Huang, N. Ohnishi, N. Sugil // Artificial Life and Robotics (Springer-Verlag). – 1997. – Vol.1, № 4. – P. 157-163.
4. A Model Based Sound Localization System and Its Application to Robot Navigation / J. Huang, T. Supaangprapa, I. Tenakuna [та ін.] // Robotics and Autonomous Systems (Elsevier Science). – 1999. – Vol. 27, № 4. – P. 199-209.
5. Xiaoling Lv. A Service Robot System Based on Hearing / Lv. Xiaoling, Zhang Minglu // CSSE – 2008. – Vol. 1. – P. 1123-1126.
6. Gustavsson L. Directional Hearing in a Humanoid Robot [Электронный ресурс] / L. Gustavsson, E. Marklund, E. Klintfors, F. Lacerda // Lund University, Centre for Languages & Literature, Dept. of Linguistics & Phonetics. Working Papers 52, 2006. – P. 45-48. – Режим доступа : http://www.ling.su.se/fon/perilus/2006_03.pdf.
7. Guangming Yuan. Design of Mending Robot Based on Hearing and Virtual Reality / Yuan Guangming, Lv. Xiaoling, Zhang Minglu // CSSE – 2008. – Vol. 1. – P. 1115-1118.
8. Vladimir E. Pavlovsky. Simulation and Experimental Elaboration of Acoustic Sensors for Mobile Robots / Vladimir E. Pavlovsky, Tatyana S. Khashan // Paper presented at the RTO SET-092 Symposium on «Advanced Sensor Payloads for UAV», (Lisabon, (Portugal). – 2 – 3 May, 2005).
9. Поливцев С.А. Исследование геометрических и акустических свойств сенсоров для системы технического слуха роботов / С.А. Поливцев, Т.С. Хашан // Проблемы бионики. – 2004. – № 60. – С. 63-69.
10. Головин Н.Я. Акустические артиллерийские приборы / Головин Н.Я. – М. : Военное из-во народного комиссариата обороны СССР, 1941. – Ч. 1, 2.
11. Гельфанд И.М. Вариационное исчисление / И.М. Гельфанд, С.В. Фомин. – М., 1961. – 228 с.
12. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям / М. Абрамовиц, И. Стиган. – М. : Наука, 1979. – 830 с.

Р.І. Мануйленко, Т.С. Хашан
Розрахунок оптимальних геометричних параметрів акустичних антен в системах технічного слуху
Для систем технічного слуху, що встановлюються на борт малих мобільних роботів, побудовано модель акустичної антени з оптимальними геометричними параметрами для середнього діапазону частот.

R.I. Manuilenko, T.S. Khashan
Calculation of Optimal Geometric Parameters of the Acoustic Antenna in Technical Hearing Systems
Specially for onboard technical hearing systems, which has been installed on small mobile robots, has been build a middle range frequency acoustical antenna with an optimal geometric settings.

Статья поступила в редакцию 11.06.2009.